

阵列类型对金属/电介质光子晶体强透射影响

肖功利^{1,2} 姚翔¹ 纪新明¹ 周嘉¹ 包宗明¹ 黄宜平¹

(¹复旦大学微电子学系 ASIC 与系统国家重点实验室, 上海 200433)
²桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 设计了正方形和正六边形圆孔阵列组成的金属/电介质光子晶体(MDPhC)来研究阵列类型对其强透射特性的影响。采用微机电(MEMS)技术制作了两种具有相同结构参数的正方形和正六边形圆孔阵列组成的金/二氧化硅/硅光子晶体,利用傅里叶变换红外光谱仪测量其反射光谱。同时,也对这两种结构进行了时域有限差分法数值模拟。理论模拟和实验测量结果均表明,与正方形圆孔阵列相比,由正六边形圆孔阵列组成的 MDPhC 能够获得较强的光透射增强效果和较窄的透射峰。

关键词 表面光学; 阵列类型; 时域有限差分法; 金属/电介质光子晶体; 强透射特性

中图分类号 O734

OCIS 240.6490 160.5298

文献标识码 A

Effect of Array Type on Extraordinary Transmission Characteristics for Metal/Dielectric Photonic Crystal

Xiao Gongli^{1,2} Yao Xiang¹ Ji Xinming¹ Zhou Jia¹ Bao Zongming¹ Huang Yiping¹

¹State Key Laboratory of ASIC & System, Department of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China
²Information & Communications College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Two kinds of metal/dielectric photonic crystals (MDPhC) combined with round hole arrays (square and hexagonal) are designed to investigate the effect of array type on extraordinary transmission characteristics for MDPhC. Two types of gold/silicon dioxide/silicon photonic crystal with the same structural parameters composed of square and hexagonal hole arrays were fabricated using MEMS technology, and their reflectance spectrums were measured using Fourier transform infrared spectrometer. At the same time, the numerical simulation was used for the two structures by finite difference time domain method. Compared with square round hole array, both the theoretical simulation results and the experimental results prove that MDPhC composed of hexagonal round hole array can obtain better effect of light transmission enhancement and narrower transmission peak.

Key words optics at surfaces; array type; finite-difference time-domain method; metal/dielectric photonic crystal; extraordinary transmission characteristics

1 引言

1998年 T. W. Ebbesen 等^[1]在实验中发现,当一束光入射到二维金属亚波长孔阵列时,在特定波长内表现出透射增强效应。由于这种透射增强效应突破了经典孔径理论的限制^[2],在可调谐光滤波器、近场光学,以及等离子体微机电(MEMS)红外光源等领域具有巨大的应用潜力^[3]。因此,对这种透射增强现象的物理机理及其相关的许多潜在应用的研究至今仍然备受关注^[4~13]。T. W. Ebbesen 等^[1,4,5,14]认为这种透射

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(90607015)和教育部博士研究生基金(20070246099)资助课题。

作者简介: 肖功利(1975—),男,博士研究生,主要从事微纳米光学及其应用方面的研究。E-mail: xgl.hy@126.com

导师简介: 黄宜平(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事微机电系统及其应用方面的研究。

E-mail: yphuang@fudan.edu.cn(通信联系人)

增强现象的物理机理是由于入射光与金属表面自由电子的电荷密度波耦合形成表面等离子体激元(SPP)。该理论模型已被绝大多数研究者所接受。同时, T. W. Ebbesen 等^[1]提到这种强透射光谱特性与孔阵列类型有关,如正方形和正六边形两种不同类型的圆孔阵列结构对其强透射光谱特性有影响。尽管 1999 年 Tineke Thio 等^[6]实验上研究了在金属铬薄膜中分别由正方形和正六边形两种类型的圆孔阵列结构的零阶-透射光谱特性,但是却没有就这两种类型的圆孔阵列结构对强透射特性的影响作比较。

最近几年,科研人员^[10~12]提出了一种由二维金属亚波长圆孔阵列和硅-空气光子晶体组合而成的金属/电介质光子晶体(MDPhC)结构,利用 MDPhC 对黑体热辐射光谱有增强透射和滤波的剪裁特性,可制成能够发射出高性能、可调谐窄带相干光的等离子体 MEMS 红外光源。本文以金/二氧化硅/硅 MDPhC 为研究对象,探讨正方形和正六边形两种圆孔阵列类型对其强透射特性的影响。采用 MEMS 技术,设计和制作了两种具有相同结构参数的正方形和正六边形圆孔阵列组成的 MDPhC,对其反射光谱进行测量。同时,采用时域有限差分法(FDTD)进行数值模拟。

2 实验与数值模拟

图 1 所示为一个由金/二氧化硅/硅三层膜组成的 MDPhC 侧面结构的示意图,它主要包括 3 个部件:二维金/二氧化硅亚波长圆孔阵列,硅-空气光子晶体,单晶硅衬底。本文所设计的金/二氧化硅/硅 MDPhC 实验样品采用了正方形和正六边形两种圆孔阵列结构。其中,阵列周期 a ,圆孔直径 $2r$,圆孔深度 $h = d_1 + d_2 + d_3$,金膜厚度 d_1 和二氧化硅膜厚度 d_2 等都是 MDPhC 结构中的几个重要几何参数。

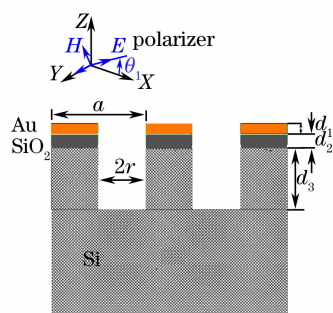


图 1 金/二氧化硅/硅 MDPhC 侧面结构的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of Au/SiO₂/Si MDPhC side structure

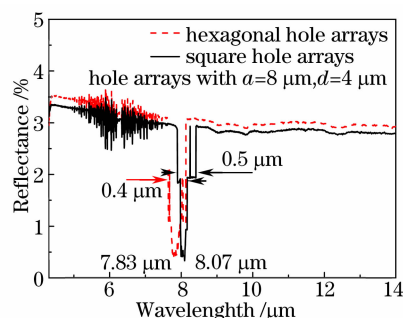


图 2 正方形和正六边形两种圆孔阵列实验样品测量的反射光谱图
Fig. 2 Measured reflection spectra of two experimental samples with square and hexagonal round hole arrays

两个金/二氧化硅/硅 MDPhC 实验样品制作的主要工艺步骤:1) 选择 3 英寸(100)晶向的 p 型单面抛光的单晶硅片作衬底材料,然后在其正面热氧化一层厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的二氧化硅薄膜;2) 在 SiO₂ 薄膜的正面上磁控溅射 $0.1 \mu\text{m}$ 金薄膜;3) 采用深反应离子刻蚀(DRIE)反刻 Au/SiO₂/Si 3 层薄膜分别形成正方形和正六边形两种阵列 MDPhC 结构,两个样品的圆孔深度都保持为 $7 \mu\text{m}$,而且每个样品的阵列周期和圆孔直径也都分别为 8 和 $4 \mu\text{m}$ 。制备好的实验样品采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测量其反射光谱,如图 2 所示。测量时光是垂直入射样品正表面的金薄膜上。

图 3 所示为正方形和正六边形两种晶格的单元晶胞、布里渊区示意图及其相对应的实验样品显微镜照片,这两种不同类型晶格的差别可以用其倒格矢来说明。若阵列周期为 a ,则:

- 1) 正方形晶格的倒格矢分别为 $(2\pi/a)\hat{x}$ 和 $(2\pi/a)\hat{y}$;
- 2) 正六边形晶格的倒格矢分别为 $(2\pi/a)(\hat{x}\sqrt{3} + \hat{y})/2$ 和 $(2\pi/a)(\hat{x}\sqrt{3} - \hat{y})/2$ 。

本文采用 FDTD 软件包^[15]对以上两种实验样品进行数值模拟,其计算模型及其参数如图 1 所示。其中,金和二氧化硅薄膜的介电常数^[16]分别为 $\epsilon_{\text{Au}} \approx -3.3 \times 10^3 + 5.9 \times 10^2 i$ 和 $\epsilon_{\text{SiO}_2} \approx 2.15$,且入射光是垂直于金属薄膜表面的平面波(磁场在传播方向的分量为零)。计算中网格单元的空间步长设为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 18 \text{ nm}$,时间步长设为 $\Delta t = \Delta x / (2c)$, c 为真空中的光速。计算空间是包含一个周期的圆孔阵列分布的三维区域,分成的空间网格数为 $50 \times 50 \times 120$,计算区域外是采用周期性边界条件。最后能够得到波长范围为

2~11 μm 的 FDTD 数值模拟反射光谱图,如图 4 所示。

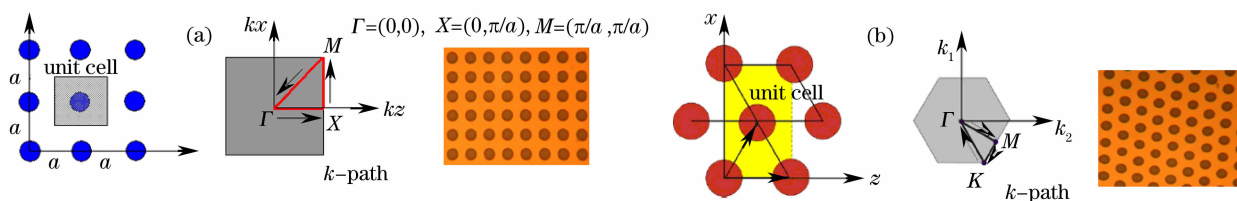


图 3 (a) 正方形晶格和(b) 正六边形晶格的单元晶胞、布里渊区示意图及其相对应的实验样品显微镜照片

Fig. 3 Schematic diagram of the unit cell, Brillouin zone for square lattice (a) and hexagonal lattice (b) as well as their microscope photographs of corresponding experimental samples

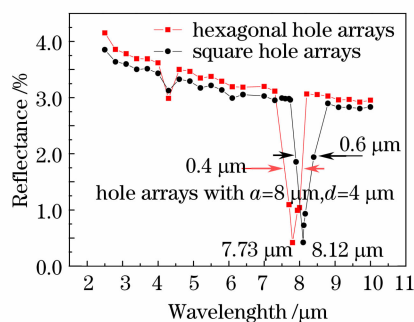


图 4 正方形和正六边形两种圆孔阵列 MDPHC 的 FDTD 数值模拟反射光谱图

Fig. 4 Calculated reflection spectra by FDTD numerical simulation for two MDPHCs with square and hexagonal round hole arrays

3 结果与讨论

3.1 测量的反射光谱

由图 2 可以看出,这两种正方形和正六边形圆孔阵列类型样品的反射光谱都会在特定波长处出现窄带反射谷。对于正方形圆孔阵列来说,在波长为 $8.07 \mu\text{m}$ 处有一反射最小值为 0.56% ,带宽为 $0.5 \mu\text{m}$;对于正六边形圆孔阵列来说,在波长为 $7.83 \mu\text{m}$ 处有一反射最小值为 0.45% ,其带宽为 $0.4 \mu\text{m}$ 。

根据能量守恒,光的吸收率可表示为 $A=1-R-T$,而实验中光的吸收率一般很低(即 $A \approx 0$),则光的透射率为 $T \approx 1-R$ 。在透射光谱中,较大的光透射率会表现出强透射即形成透射峰,而在反射光谱中则对应着反射谷。这也说明了本实验中的两种实验样品对光具有强透射特性。

3.2 模拟的反射光谱

由图 4 可见,正方形和正六边形圆孔阵列类型 MDPHC 的反射光谱也都会在特定波长处出现窄带反射谷,这说明其对光具有强透射特性。对于正方形圆孔阵列来说,在波长为 $8.12 \mu\text{m}$ 处有一反射最小值为 0.47% ,其带宽为 $0.6 \mu\text{m}$;对于正六边形圆孔阵列来说,在波长为 $7.73 \mu\text{m}$ 处有一反射最小值为 0.42% ,其带宽为 $0.4 \mu\text{m}$ 。

比较图 2 与 4 的结果,可以发现:1) 实验测量结果和理论模拟均发现正方形圆孔阵列 MDPHC 反射最小值位置比阵列周期稍偏大,而正六边形圆孔阵列 MDPHC 反射最小值位置比阵列周期稍偏小;2) 同正方形圆孔阵列相比较,实验测量结果和理论模拟均发现正六边形圆孔阵列 MDPHC 反射最小值较小且其带宽较窄,其结果与文献[12]报道的相一致。这也证明了由正六边形圆孔阵列组成的 MDPHC 能够获得较强的光透射增强效果和较窄的透射峰。

特征 1 可以解释为光通过 MDPHC 时展现出的强透射特性是由于 SPP 共振耦合作用^[14]。若光垂直入射到金属/电介质界面中(即 $\theta=0^\circ$)时,则由正方形和正六边形两种圆孔阵列组成的 MDPHC 的反射最小值位置(λ_{min})可以从理论上推算出^[6]:

1) 正方形圆孔阵列组成的 MDPHC 的 $\lambda_{\text{min}} = a_0 (i^2 + j^2)^{-1/2} [\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d)]^{1/2}$,其中 i, j 为整数,对应于不同的增强级次; ϵ_m 和 ϵ_d 分别为金属及其相邻的电介质材料的介电常数;

2) 正六边形圆孔阵列组成的 MDPHC 的 $\lambda_{\min} = a_0 [4(i^2 + ij + j^2)/3]^{-1/2} [\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d)]^{1/2}$ 。

若采用该理论模型来比较正方形和正六边形两种圆孔阵列组成的 MDPHC 的 λ_{\min} 大小,显然特征 1 也是成立的。

特征 2 主要原因为:金属/电介质界面中的晶格类型对 SPP 激发与耦合作用的影响;硅-空气光子晶体形成的光子带隙结构对 SPP 激发与耦合作用的影响。Reuven Gordon 等^[13]认为孔阵列在金属薄膜中的排列(即晶格类型)会影响通过 SPP 激发与耦合作用来调制的光强透射特性。对于周期性孔阵列,晶格轴的方向确定 SPP 激发的概率。与此同时,Carsten Rockstuhl 等^[17]也认为圆孔阵列的 SPP 耦合作用与晶格的对称性相关。那么,同正方形圆孔阵列相比,对称性更好的正六边形晶格组成的 MDPHC 展现出较强的光透射增强效果和较窄的透射峰是可以理解的。另外,硅-空气光子晶体与金属/电介质界面中的 SPP 之间的耦合作用也有相关报道^[7,10,12],他们都认为硅-空气光子晶体中形成的光子带隙结构会对 SPP 激发与耦合作用存在影响。

3.3 硅-空气光子晶体的光子带隙

利用 RSoft CAD 软件^[18]中的 Band-SOLVE 工具的平面波展开法分别对由正方形和正六边形两种圆孔阵列组成的硅-空气光子晶体的光子带隙进行模拟^[19,20]。首先要定义其几何参数($a=8 \mu\text{m}$ 和 $r/a=0.25$)和材料参数($n_{\text{Si}}=3.42$ 和 $n_{\text{air}}=1$),模拟后就得到图 5 所示的横电/横磁(TE/TM)波光子带隙。比较两种结果只发现正六边形圆孔阵列的硅-空气光子晶体中存在一个 TE 光子带隙,正是这个 TE 光子带隙的存在促进了 SPP 激发与耦合作用来增强 MDPHC 中光的透射效果。

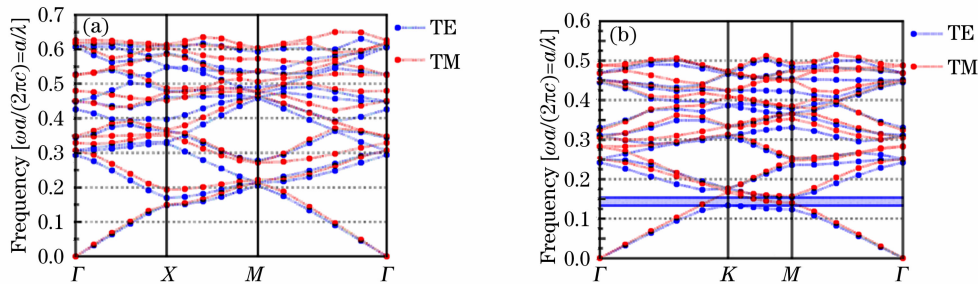


图 5 硅-空气光子晶体形成的 TE/TM 光子带隙。(a) 正方形圆孔阵列,(b) 正六边形圆孔阵列

Fig. 5 TE/TM photonic bandgap formed by silicon-air photonic crystal. (a) square round hole arrays, (b) hexagonal round hole arrays

4 结 论

从实验和理论两个方面证明了阵列类型对 MDPHC 强透射特性的影响。得到两个主要研究结果:1) 正方形圆孔阵列 MDPHC 的反射最小值位置大于阵列周期,而正六边形圆孔阵列类型 MDPHC 的反射最小值位置小于阵列周期,这可以从 SPP 耦合理论模型得到解释;2) 同正方形圆孔阵列相比较,正六边形圆孔阵列组成的 MDPHC 能够获得较强的光透射增强效果和较窄的透射峰。这是由于正六边形圆孔阵列极对称的晶格结构和其硅-空气光子晶体中形成的 TE 光子带隙都会促进 SPP 激发与耦合作用。这些研究结果为利用 MDPHC 的强透射特性来制作等离子体 MEMS 红外光源提供理论参考。

参 考 文 献

- 1 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*, Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- 2 H. A. Bethe. Theory of diffraction by small holes[J]. *Phys. Rev.*, 1944, **66**(7): 163~182
- 3 Xiao Gongli, Yao Xiang, Huang Yiping *et al.*, Progresses on extraordinary transmission characteristics of two-dimensional metallic subwavelength hole arrays[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(2): 161~167
肖功利,姚翔,黄宜平等. 二维金属亚波长孔阵列的强透射特性研究进展[J]. *半导体光电*, 2009, **30**(2): 161~167
- 4 L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal, J. B. Pendry *et al.*, Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(6): 1114~1117

- 5 A. Krishnan, T. Thio, T. W. Ebbesen *et al.*. Evanescently coupled resonance in surface plasmon enhanced transmission [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**(1): 1~7
- 6 Tineke Thio, H. F. Ghaemi, H. J. Lezec *et al.*. Surface-plasmon-enhanced transmission through hole arrays in Cr films [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(10): 1743~1748
- 7 Han-Kuei Fu, Yu-Wei Jiang, Ming-Wei Tsai *et al.*. A thermal emitter with selective wavelength; Based on the coupling between photonic crystals and surface plasmon polaritons[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**(3): 033505
- 8 Weili Zhang, Abul K. Azad, Jianguang Han *et al.*. Direct observation of a transition of a surface plasmon resonance from a photonic crystal effect[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(18): 183901
- 9 Ming-Wei Tsai, Chia-Yi Chen, Yu-Wei Jiang *et al.*. Coupling between surface plasmons via thermal emission of a dielectric layer sandwiched between two metal periodic layers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(21): 213104
- 10 Irina Puscasu, M. Pralle, M. McNeal *et al.*. Extraordinary emission from two-dimensional plasmonic-photonic crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(1): 013531
- 11 M. U. Pralle, N. Moelders, M. P. McNeal *et al.*. Photonic crystal enhanced narrow-band infrared emitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(25): 4685~4687
- 12 R. Biswas, C. G. Ding, I. Puscasu *et al.*. Theory of subwavelength hole arrays coupled with photonic crystals for extraordinary thermal emission[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **74**(4): 045107
- 13 Reuven Gordon, Alexandre G. Brolo, Karen L. Kavanagh *et al.*. Resonant optical transmission through hole-arrays in metal films; physics and applications[J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2009, **4**(2): 1~25
- 14 H. Rather. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings[M]. Berlin; Springer Tracts in Modern Physics, 1988. 111
- 15 A. Taflove. Computational Electrodynamics; The Finite-Difference Time-Domain Method [M]. 2nd ed., Boston: Artech House, 2000
- 16 M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell *et al.*. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(17): 1099~1119
- 17 Carsten Rockstuhl, Thomas Zentgraf, Harald Giessen *et al.*. Enhanced transmission of periodic, quasiperiodic, and random nanoaperture arrays[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(15): 151109
- 18 Rsoft Design Group, Inc. "BandSOLVE 1.3"
- 19 Lin Xubin, Chen Yujie, Li Baojun. Photonic crystal with absolute band gap in a two-dimensional quasi-honeycomb structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 126~130
林旭彬, 陈钰杰, 李宝军. 类蜂窝状结构完全带隙二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 126~130
- 20 Li Yiyu, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Filling-factor graded wavelike two-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 169~173
厉以宇, 顾培夫, 刘旭等. 填充率渐变型波状结构二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 169~173